



Electric vehicles in Danish power system with large penetration of wind power

Yang, Lihui; Xu, Zhao; Østergaard, Jacob; Foosnæs, A.

Published in:
Dianli Xitong Zidonghua

Publication date:
2011

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Yang, L., Xu, Z., Østergaard, J., & Foosnæs, A. (2011). Electric vehicles in Danish power system with large penetration of wind power. *Dianli Xitong Zidonghua*, 35(14), 43-47.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

电动汽车在含大规模风电的丹麦电力系统中的应用

杨黎晖^{1,2}, 许 昭², J. ØSTERGAARD³, A. FOOSNÆS⁴

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 香港理工大学电机工程学系, 香港;

3. Centre for Electric Technology, Technical University of Denmark, 丹麦; 4. Danish Energy Association, 丹麦)

摘要: 电动汽车不仅为减少 CO₂ 排放量提供了独特契机, 而且对于电力系统而言还具有平衡能力和提供备用服务的功能。结合丹麦电力系统及社会的特点, 通过成本效益分析, 阐明了具有智能充/放电功能的电动汽车在保证含有大规模可再生能源的电力系统可靠运行方面具有很大的潜力并会带来显著经济效益。通过分析, 明确了目前在电动汽车应用方面存在的重要技术问题, 阐述了为设计含大规模风电和电动汽车的丹麦电力系统而建立的 EDISON 项目的相关研究和开发方案。介绍了 EDISON 项目的最新进展, 即采用虚拟发电厂技术实现电动汽车智能充放电的管理。

关键词: 电动汽车; 风力发电; 电动汽车接入网络; 虚拟发电厂

0 引言

丹麦政府于 2007 年颁布了新的能源政策, 规划至 2025 年可再生能源的发电量须占电能消耗总量的 30%。这就意味着截至 2025 年, 丹麦电力系统中风电的渗透率将会从 2005 年的 20% 增长到 50%^[1]。风电的渗透率增大到 50% 将会给电力系统的平衡能力带来很大挑战。在这种情况下, 为了维持电力系统的功率平衡和稳定, 丹麦需要考虑所有可以利用的措施, 包括增加向邻国的输电量和利用本国的柔性资源如水电机组等可以快速改变出力的发电设备。

电动汽车是一种具有应用前景的系统平衡资源^[2-3], 其不仅可以作为储能设备减小可再生能源特别是风电导致的功率波动, 而且能为电力系统的可靠运行提供有价值的系统辅助服务。由于电力系统、社会行为、地理条件和国家政策方面的特点, 使得丹麦具有发展电动汽车的优势^[4]。因此, 为了解决在风电渗透率达到 50% 时丹麦电力系统实时运行时的平衡问题, 电动汽车就成为一项重要的系统平衡资源。

在此背景下, 丹麦近期启动了很多关于电动汽车的研发项目, 其中最受关注的是研究电动汽车智能并网及其与风电相互作用优化的 EDISON 项目。EDISON 项目是一个资助强度大且研究范围广的电动汽车并网项目, 由丹麦技术大学(DTU)电气工程系、Risø-DTU 研究中心、丹麦的 Dong 和 Østkraft 电力公司、Eurisco 公司、IBM 和西门子进行合作研究, 并将在丹麦 Bornholm 岛上开展实地示范。

本文通过成本效益分析阐明了电动汽车在丹麦的发展潜力, 分析了目前在电动汽车应用方面存在的重要技术问题, 着重介绍了 EDISON 项目的研究和开发方案, 并简述了项目的最新进展。

1 电动汽车接入丹麦电力系统带来的效益

1.1 电动汽车的成本效益分析

丹麦地处北欧, 气候寒冷、采暖期长, 考虑到这一特点, 丹麦正积极发展热电联产(CHP)。利用众多分散的小型热电联产, 将电力输送到各家各户的热泵中, 这不仅解决了供暖问题, 还将多余的风能转化为热能。热电联产是丹麦解决电力系统平衡问题的一个重要措施。

这里采用 SIVAEL(由丹麦输电系统运营机构 Energinet.dk 开发的机组组合和经济调度模型, 主要用于解决热电联产的最优调度问题^[5])仿真模型^[6]计算了 2020 年电动汽车(以及热泵)为丹麦所带来的经济影响。在计算和分析中作以下几点重要假设:

1) 到 2020 年, 电动汽车占公路交通的 10%, 热泵占集中供暖需求的 10%, 占分户采暖需求的 33%。

2) 电动汽车具有智能充放电功能。

3) 基于由丹麦输电系统运营机构(Energinet.dk)制订的丹麦电力系统发展规划, 其考虑了传统发电厂、跨区域输电能力和燃油费用等。

“欧洲 2020 战略”规定了丹麦在发展新能源和节能减排方面需履行的责任(下面的顺序表示引入电动汽车和热泵对其影响的程度): ①可再生能源发电的穿透功率增加 5%; ②不受配额限制的行业 CO₂ 排放量每年减少 300 万 t; ③可再生能源应用于

交通行业的比例增加 40%;④能源效率增加 7%。

分析结果表明,引入电动汽车和热泵可使丹麦完成上述规定责任的约 40%。另外,当 2025 年电动汽车的渗透率达到 15%时,考虑汽车投资、能源系统和排放(不包括充/放电控制和电动汽车接入网络技术的成本),分析得出如果实现智能电动汽车充放电管理,可以提供的系统平衡等服务的经济效益将约为 1.5 亿欧元/年。如果假设电动汽车只是实施简单的基于时间控制的充电管理,则能源系统的成本(包括系统服务)将增加 1.9 亿欧元/年,这将使经济效益成为负值^[7]。

1.2 电动汽车提供备用服务

虽然每辆电动汽车电池的电能存储量有限,但通过一定的管理措施可以实现对大量电动汽车电池统一充/放电的灵活控制,这样电动汽车就具有为电力系统提供辅助服务的能力。目前丹麦的汽车总数约为 200 万辆。如果假设这些汽车均为电动汽车且每辆车的额定充/放电功率为 2 kW,那么所有电动汽车的电池可以提供的总功率为 4 GW,然而目前丹麦电力系统的最大电力需求仅为 7 GW。

电动汽车可以提供全方位的系统服务。根据北欧电力系统的运行规程,可提供的服务包括一次(调频)备用(也称瞬时备用)、二次(调频)备用(也称快速备用,包括负荷频率控制)和手动备用。本节的经济分析将主要关注电动汽车提供二次(调频)控制和手动备用。在丹麦西部电力系统中,电动汽车在二次控制和手动备用方面的收益包括提供容量和电量两部分。由于未来电力市场具有不确定性,所以在对电动汽车所提供的服务进行经济潜力分析时作出了以下几点假设:

1)电动汽车采用分布式充/放电,例如在住宅区或办公区充电。车主将电动汽车注册为可调度汽车参与电力系统辅助服务,为此获得相应的经济回报。通过这种方式,就将大量电动汽车虚拟聚集起来,克服了单辆汽车电池容量有限的问题。

2)能源部分的价格基于 2007 年 Nord Pool 的市场出清价格。

3)备用容量部分的价格基于丹麦西部电力系统 2007 年相应的辅助服务数据。

4)为电力系统的备用服务预留一定的电池容量,此项资金投入量为 2 500 丹麦克朗/(kW·h),并且假设电动汽车提供给电力系统服务的年可利用时间为 80%。

在上述假设条件下,一辆额定充/放电功率为 2 kW、容量为 5 kW·h 的电动汽车在二次调频控制方面的年总收益将为 1 400 丹麦克朗,在上调备用(up-regulation)方面为 1 500 丹麦克朗,在下调备

用(down regulation)方面为 510 丹麦克朗。如果电动汽车充/放电额定功率增大到 20 kW,每辆车在负荷频率控制方面的年总收益将增大 10 倍。分析结果表明,采用电动汽车提供调频服务会带来很高的效益。另外,一辆充/放电额定功率为 20 kW、服务容量为 5 kW·h 的电动汽车,考虑运行和维护成本,其电池的投资回收期仅需要 2 年。这些都证明了电动汽车具有巨大的经济潜力^[7]。

2 研发需求分析

2.1 EDISON 项目概述

从 2008 年到 2009 年,丹麦已经启动了很多关于电动汽车的研究项目,其中主要的几项如表 1 所示。

表 1 丹麦在 2008—2009 年启动的
几项关于电动汽车的项目
Tab. 1 Selected electric vehicle initiatives in Denmark
started in 2008—2009

项目	负责方	预算/ 万欧元
电动汽车基础设施的全面商业化	电动汽车服务提供商 Better Place Denmark(由 丹麦 Dong 能源公司支持)	10 400
EDISON: 电动汽车智能并网及其与风电相互作用优化的研发项目	丹麦能源协会、丹麦 Dong 能源公司、丹麦技术大学、Eurisco、IBM、丹麦 Østkraft 能源公司和西门子	560
电动汽车的测试项目 (国家支持项目)	丹麦能源局	400+ 合作资金

为了经济而高效地将大规模电动汽车接入丹麦电力系统并且确保与风电的智能交互,仍需对许多技术问题进行深入研究。表 1 中的 EDISON 项目正是针对电动汽车接入含大规模风电的电力系统所开展的一项重要的研发项目。该项目始于 2009 年,主要研究电动汽车基础设施和与并网相关的技术问题。具体地讲,EDISON 项目拟解决的关键问题为:

1)将虚拟发电厂(virtual power plant,VPP)的各类模型应用于电动汽车管理。

2)风电并网:如何解决风电出力的波动性是研究的关键内容。

3)技术:对电池进行快速充电以及在几分钟内完成大型电池箱的更换都需要电池技术和电力电子技术的支持,而目前有限的技术水平已成为制约电动汽车发展的瓶颈。对这些相关技术进行研究也是需要解决的关键问题。

4)规模:该项目将会在丹麦 Bornholm 岛(岛上有 4 万居民)上开展实际试点,研究当电动汽车数量增加时能源系统如何发挥作用,从而确定电动汽车的适当发展规模。

2.2 充电设施构架

分析电动汽车充电设施可能采用的构架并做出恰当的选择是 EDISON 项目的首要研究内容。

目前电动汽车的充电设施构架主要有分布式和集中式两大类:分布式主要指分布式低功率充电,而集中式则主要包括电池更换站和快速充电站。

EDISON 项目根据丹麦的行车形态(即关于车辆驾驶里程和时间的信息,通过分析这些信息可确定每段时间可以进行充/放电的电动汽车的数量)对充电设施构架进行评估。着重对包含大量低电压(230 V)的分布式充电站(分布于每栋住宅楼和办公区的停车场)和少量快速充电站与电池更换站的充电设施构架进行研究。快速充电站和电池更换站可以弥补分布式充电设备无法使用时的不足,例如当电动汽车的电池容量不够完成一次完整的行程所需的电量时,就可以通过快速充电站或电池更换站补充电能。可见,分布式充电是一种常规的充电构架,而快速充电站和电池更换站则被视为分布式充电的辅助方案。

如果可以在几分钟内以大功率完成电池的完全充电,且在这一过程中的散热问题能够得到较好解决,那么就能以类似目前加油/气站的模式建立快速充电站。由于电动汽车在快速充电完成后不需要长时间与电力系统连接,所以与分布式充电方式相比,在快速充电方式下电动汽车与电力系统间进行双向能量流动就相对较少。

电池更换站与快速充电站有所不同。一定数量的电池被集中在电池更换站中以备更换之需。在更换站中,将空电池进行充电,而完成充电的电池则等待被再次利用。在电力系统需要时,完成充电的电池将会为电力系统提供备用和调频服务。

EDISON 项目还对每种充电构架进行深入、细致的研究,包括采用交流还是直流方式充电,基于荷电状态的电池循环寿命特性分析,采用导体还是感应方式充电及其产生的热量的处理方法,电动汽车入网技术的可行性等问题。研究目标是对所有充电构架的运行条件进行分析、对相关参数进行优化,以确保对电力系统不造成危害。

2.3 智能充电管理

前已述及,电动汽车比例增大时利用电动汽车入网技术可以提高风电比例和电力系统的稳定性,电动汽车分散充电的智能管理则是实现这一功能的

前提。在 EDISON 项目中,利用中央软件管理平台来实现智能充电管理,采用专有的虚拟元件代表每辆电动汽车和每个充电站,每辆电动车和每个充电站都具有智能行为。这种智能性表现在根据系统中风电的可利用情况来启动或停止充电,这样可以根据需求从电动汽车电池向系统注入电能。

管理平台基于面向服务的构架,使异构数据源与应用程序之间可以进行实时通信。该平台被设计成实时事件程序规划模型,根据预定义事件来控制大量分散单元。这种基于 Internet 控制技术的分散构架非常适用于像电动汽车这类移动单元的管理。

2.4 相关标准的制定

电动汽车智能并入具有入网服务的电力系统的一个重要前提就是具有标准连接接口和基于开放标准的通信接口。

国际标准化组织(ISO)和国际电工委员会(IEC)在电力产业联盟的支持下已经决定成立一个联盟来推广汽车工业和电力设施。表 2 给出了一些关于电动汽车通信方面的重要标准。

表 2 关于电动汽车的重要国际标准概况
Tab. 2 Overview of important international standards related to electric vehicles

标准编号	标准名称
IEC TC69 (61851-1)	Electrical vehicle conducting charging system
IEC SC23H/ PT62196	Dimensional interchangeability requirements for pin and contact-tube vehicle couplers
ISO TC22/SC3/SC21	Road vehicles
IEC/ISO JWG V2G CI	Joint working group for vehicle to grid communication interface
IEC TC57 (61850-7-420)	Basic communication structure for distributed energy resources

电动汽车工业界帮助国际标准组织完成标准的制定工作并通过示范项目对其进行必要的验证,这对标准化过程来讲非常重要。EDISON 项目将参与国际标准组织并帮助制定和实施初步草案,从而协助电动汽车相关标准化过程的顺利完成。

3 EDISON 项目的最新进展

EDISON 项目运用虚拟发电厂技术实现了电动汽车智能充电管理。

3.1 虚拟发电厂的概念

虚拟发电厂实际上是由若干个小发电单元组成的并网集成系统,这些发电单元可以是微型联合热机组(μ CHP)、风机、电动汽车等。整个虚拟发电厂对其输出的控制是基于对每个单元完全或部分的控制来完成的。虚拟发电厂能有效集成各种分布

式单元,使集成后的系统在与电力系统并网运行中拥有与真正发电厂一样的功能。

虚拟发电厂对每个发电单元的控制可以通过集中或分散方式实现,如图1所示。集中式虚拟发电厂中的所有决策和控制由虚拟发电厂的中央协调机构来执行,而发电单元也由中央协调机构直接控制。分布式虚拟发电厂则是把每个发电单元作为一个独立、智能、自主响应的个体,每个单元通过接收虚拟发电厂中央协调机构发出的激励信号而独立地做出反应。这种设计常使用价格信号作为激励虚拟发电厂提供系统服务和缓解输电阻塞的手段^[8]。

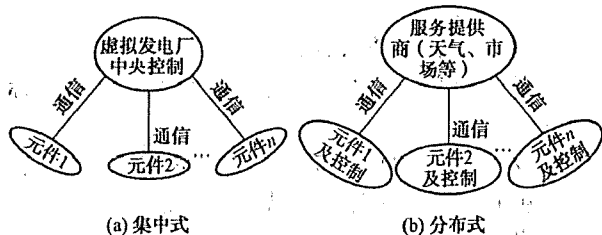


图1 集中和分布控制的虚拟发电厂
Fig.1 VPP under distributed control and centralized control

3.2 虚拟发电厂的目标

虚拟发电厂中的元件可以通过协调控制以实现不同的目标。虚拟发电厂的控制目标可以是针对电力市场中的某个/类成员,协助其获取最大利润;也可用于为系统运行获取辅助服务如备用和调频等。根据不同的控制目标,虚拟发电厂分为商业型和技术型2种。这2种虚拟发电厂已经在FENIX项目(由欧盟8个国家的19个研究机构和组织在欧盟第六框架计划下开展对虚拟发电厂的开发、管理及运行的研究)中得到了研究和测试^[9]。

3.3 虚拟发电厂的实施和运行

一个虚拟发电厂的实施和运行取决于其控制目标和方式的选择。例如,在考虑与电力市场的相互作用时需要虚拟发电厂中央协调机构的运行逻辑做出一定要求。文献^[10]通过一种基于功能模块的方法来概括各种不同的虚拟发电厂控制目标并且构造了一个通用的、可重复使用的虚拟发电厂模型,在此基础上,发展了一个能够提供一系列服务并包含多个功能部件的通用虚拟发电厂架构。

3.4 虚拟发电厂在EDISON项目中的应用

虚拟发电厂集成各种单元的方法满足了EDISON项目中协调大量电动车并网充/放电的需求。在这个项目中,可以将电动汽车的分布式充/放电平台看成一个包含大量电动汽车的虚拟发电厂的实例。因此,EDISON项目的集成平台可以被称为电动汽车虚拟发电厂。它既可以被视为一个以市场

为导向的商业虚拟发电厂,同时也是一个基于对各种分布单元采用中央控制的技术型虚拟发电厂。EDISON项目在对虚拟发电厂集成能力进行深入研究的基础上已经完成了对分布式充/放电管理平台的设计。

并网电动汽车虚拟发电厂的结构如图2所示,包括电动汽车控制模块组、数据存储和成员管理模块组以及集成和并网接口模块组。

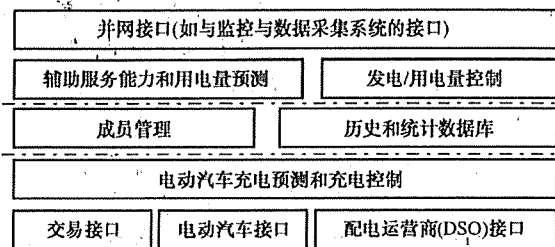


图2 并网电动汽车虚拟发电厂的结构
Fig.2 Structure of an integrated electric vehicle VPP

电动汽车控制模块组包含4个模块,其作用是对每辆电动汽车进行管理和控制,例如:充电预测、充电控制、反馈信息以及为用户提供电费结算信息等。电动汽车接口模块用于实现电动汽车虚拟发电厂与电动汽车和其他分布式发电单元的通信。配电运营商(distribution system operator, DSO)接口模块不仅可以为每辆电动汽车收集电网状态数据,还可从配电运营商处收集结算所需的计量信息。交易接口模块为电动汽车用户提供所有的电费结算信息。充电预测和充电控制模块根据历史和统计数据预测将要在充电站进行充电的电动汽车所需的充电电量,为其提供充电时间、充电状态等信息,并根据预测为每辆电动汽车计算出最优充电计划。

数据存储和成员管理模块组包括2个模块。历史和统计数据库为电动汽车充电预测和充电控制模块、发电/用电量控制模块、辅助服务能力和用电量预测模块以及电费交易提供数据。成员管理模块可以为电动汽车用户提供修改其缺省设置和需求的服务。

集成和并网接口模块组包括3个模块。其中辅助服务能力和用电量预测模块从数据库模块中将每辆电动汽车的预测数据集中在一起,据此计算出电动汽车虚拟发电厂在未来时间段将消耗的总电量和为系统提供辅助服务的能力及规划。此规划通过并网接口模块发送给上层的监控与数据采集(SCADA)系统。发电/用电量控制模块根据充电预测和充电控制模块发出的指令对电动汽车虚拟发电厂进行日常管理和控制;同时根据从上层监控与数据采集系统得到的指令,通过并网接口模块为电力

系统提供辅助服务。并网接口模块的功能则是实现电动汽车虚拟发电厂和监控与数据采集系统的连接和数据交换。

4 结语

电力系统、社会行为、地理条件和国家政策方面的特点使得丹麦具有发展电动汽车的优势。由于电动汽车具有为电力系统提供备用和调频服务的功能,其智能接入含大规模风电的电力系统具有切实的经济效益。本文分析和阐述了电动汽车并入含大规模风电的丹麦电力系统所存在的技术挑战和研发需求,并重点介绍了丹麦 EDISON 项目的研究内容和最新进展。EDISON 项目通过运用虚拟发电厂技术实现了电动汽车智能充放电管理。

感谢丹麦 Dong 能源公司的 Torben V. HOLM, 丹麦 Østkraft 能源公司的 Maja BENDTSEN, 丹麦 Energinet. dk 的 Kim BEHNKE, 丹麦 Eurisco 公司的 Claus ANDERSEN 以及西门子能源(丹麦)的 Sven HOLTHUSEN。

参考文献

- [1] Danish Energy Agency. A visionary Danish energy policy [EB/OL]. [2010-08-07]. http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Energipolitik_UK/a_visionary_Danish_energy_policy/pdf/Engelsk_endelig_udgave_visionaer_energi.pdf.
- [2] DIVYA K C, ØSTERGAARD J. Battery energy storage technology for power systems—an overview[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 511-520.
- [3] XU Z, GORDON M, LIND M, et al. Towards a Danish power system with 50% wind-smart grids activities in Denmark[C]// Proceedings of IEEE PES General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-8.
- [4] 徐立中, 杨光亚, 许昭, 等. 电动汽车充电负荷对丹麦配电系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 18-23.
XU Lizhong, YANG Guangya, XU Zhao, et al. Impacts of electric vehicle charging on distribution networks in Denmark [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 18-23.
- [5] PEDERSEN J S. Simulation program for combined heat and power production[C]// Proceedings of the International Conference on Application of Power Production Simulation (EPRI/SEP), June 11-13, 1990, Washington, USA.
- [6] ERIKSEN P B. Economic and environmental dispatch of power/CHP production systems[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 57(1): 33-39.
- [7] Energinet dk. Effektiv anvendelse af vindkraft-baseret el i Danmark [R/OL]. [2010-08-07]. <http://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments>.
- [8] ALVARADO F L. Controlling power systems with price signals [J]. Decision Support Systems, 2005, 40(3/4): 495-504.
- [9] EU Fenix project. Flexible electricity network to integrate the expected energy evolution [EB/OL]. [2010-08-07]. <http://www.fenix-project.org>.
- [10] YOU S, TRÆHOLT C, POULSEN B. Generic virtual power plants: management of distributed energy resources under liberalized electricity market[C]// Proceedings of the 8th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 8-11, 2009, Hong Kong, China: 1-6.

杨黎晖(1980—),女,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:风力发电并网的稳定性分析与控制。E-mail: lihui.yang@mail.xjtu.edu.cn

许昭(1974—),男,助理教授,主要研究方向:电动汽车并网、风力发电并网、电力市场规划与管理。E-mail: eezhaoxu@polyu.edu.hk

J. ØSTERGAARD(1969—),男,教授,主要研究方向:新能源并网、未来电力系统的控制结构。E-mail: joe@elektro.dtu.dk

Electric Vehicles in Danish Power System with Large Penetration of Wind Power

YANG Lihui^{1,2}, XU Zhao², J. ØSTERGAARD³, A. FOOSNÆS⁴

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

3. Centre for Electric Technology, Technical University of Denmark, Denmark;

4. Danish Energy Association, Denmark)

Abstract: Electric vehicles (EVs) provide a unique opportunity for reducing the CO₂ emissions from the transport sector. At the same time, EVs have the potential to play an important role in the economical and reliable operation of an electricity system with high penetration of renewable energy. An analysis is made of the potential for using EVs in Denmark, and the benefits of the electric power system with high wind power generation by intelligent charging and discharging of EVs are enumerated. Based on the analysis, important technological gaps are identified, and the corresponding research and development initiatives of the recently established EDISON program are described. Moreover, the latest development of the EDISON program is treated, that is, EDISON as a research consortium to design a new model for the Danish power system with high penetration of wind power and EVs with vehicle to grid (V2G). The managing structure of V2G adopting virtual power plant (VPP) technology is proposed.

Key words: electric vehicle (EV); wind power; vehicle to grid (V2G); virtual power plant (VPP)